

Modélisation ROMS du Déroit de Danemark : Analyse de la circulation océanique au seuil du déroit

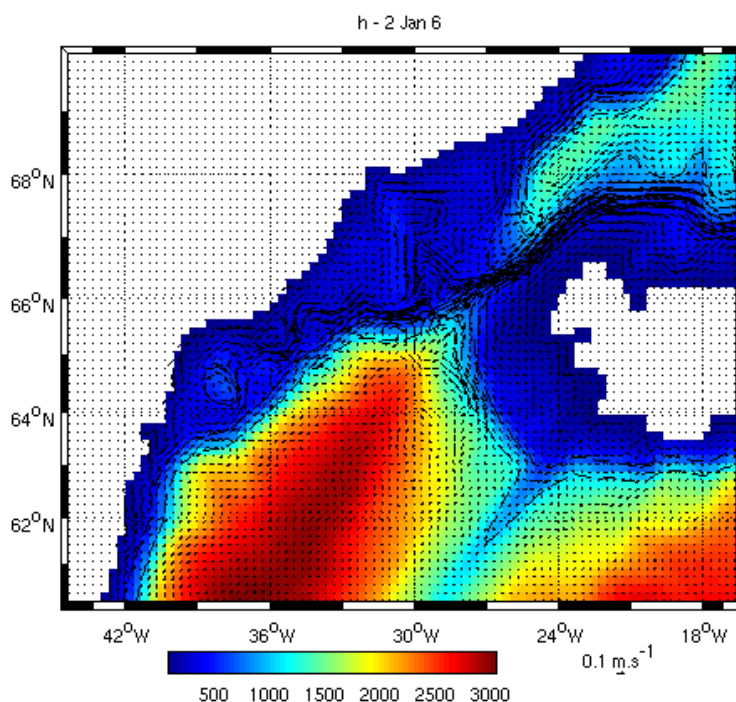


Figure 1 : Carte bathymétrique du Déroit de Danemark. Sortie du modèle ROMS pour le mois de janvier de l'année 6

Présenté par Segalla Diane

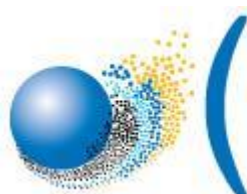
Pour Doglioli Andrea

Travail réalisé dans le cadre de l'UE OPB 205 « Modélisation 3D de la circulation océanique »

Master Sciences de la mer, spécialité couplage océanographie physique-biogéochimie, première année

Université d'Aix-Marseille

06 mai 2019



Institut PYTHEAS
Observatoire des Sciences de l'Univers
Aix-Marseille Université

TABLES DES MATIERES

- 1. Introduction..... 1
- 2. Méthode..... 3
- 3. Résultats..... 3
 - 3.1. Diagnostics..... 3
 - 3.2. Température..... 4
 - 3.3. Salinité 6
 - 3.4. Vitesse 7
- 4. Discussion 8
- 5. Conclusion 10
- 6. Résumé..... 10
- 7. Références..... 10

1. Introduction

1.1. Le site d'étude

Le Détroit de Danemark est une région appréciée pour l'étude de sa bathymétrie et les transports des courants associés. Il se situe au nord de l'Atlantique entre le Groenland et l'Islande vers 66°33' N et 26° 71' W. Ce détroit relie la mer du Groenland et la mer d'Irminger par un passage étroit d'environ 480 Km. C'est un lieu qui contient un des plus grands transports d'eaux denses de l'Arctique.

Le Détroit de Danemark est aussi appelé sous le nom de « Débordement du Détroit de Danemark » à cause de son seuil qui représente une pente importante sur la portion aval (cf. Fig.1). L'hydrologie de cette région concerne un panache important qui vient des eaux de l'Arctique et qui va se mélanger aux eaux profondes de l'Atlantique Nord (Jochumsen et al., 2015). Le détroit comporte donc plusieurs masses d'eau qui proviennent des différents courants de l'océan Arctique dont 3 principaux : le Courant du Groenland Est (EGC)¹, le Courant Nord Islandais d'Irminger (NIIC)² et le Jet Nord Islandais (NIJ)³ (cf. Fig.2) (Mastropole et al., 2017).

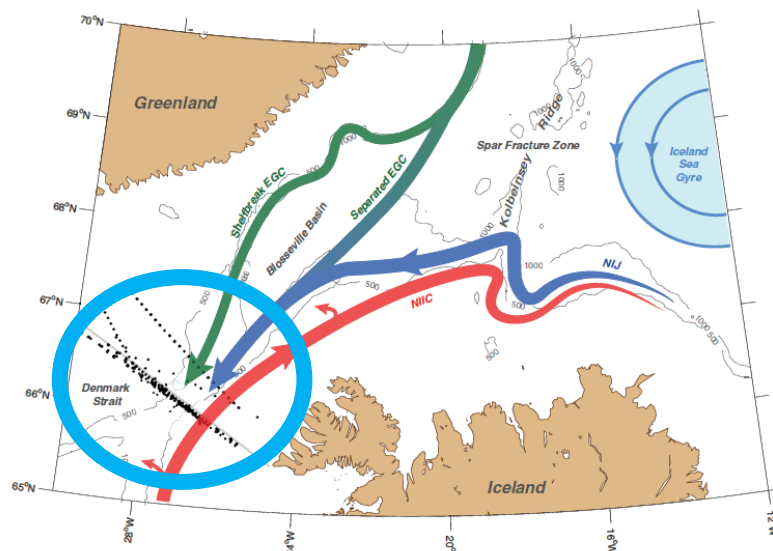


Figure 2 : Représentation du Détroit de Danemark avec les courants principaux tels que le Courant du Groenland Est en vert et sa séparation, le Courant Nord Islandais d'Irminger en rouge et le Jet Nord Islandais en bleu adapté de Mastropole et al., 2017. Le cercle bleu représente la position du détroit

1.2. Modèle ROMS

Pour cette étude, un modèle ROMS (Regional Ocean Modelling System) a été implémenté avec les forçages climatiques sur la région océanique du Détroit de Danemark. C'est un outil de modélisation 3D océanique qui résout les équations primitives. Il comporte des algorithmes physiques et numériques qui servent à coupler des modèles utiles en biogéochimie par exemple. La simulation ROMS Agrif a été réalisée avec les équations primitives telles les équations de Navier-Stokes,

¹ En anglais EGC = East Groenland Current

² En anglais NIIC = North Icelandic Irminger Current

³ En anglais NIJ = North Icelandic Jet

l'équation de continuité, l'équation de la conservation de la chaleur et du sel ainsi que l'équation d'état de l'eau de mer comme suit (cf. Fig.3) :

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u - f v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + A_h \nabla_h^2 u + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\
 & \frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \nabla v + f u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + A_h \nabla_h^2 v + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\
 & 0 = \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g \\
 & 0 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \\
 & \frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T = K_h \nabla_h^2 T + K_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \\
 & \frac{\partial S}{\partial t} + u \cdot \nabla S = K_h \nabla_h^2 S + K_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \\
 & \rho = \rho(T, S, z)
 \end{aligned}$$

Figure 3: Encadré rouge : équations de Navier-Stokes, encadré bleu : équation de continuité, encadré vert : équation de la chaleur et du sel, encadré brun : équation d'état de l'eau de mer, adapté du cours de modélisation 3D océanique de Doglioli Andrea

La simulation comporte aussi des approximations et hypothèses comme :

- L'approximation de Boussinesq
- L'hypothèse de l'équilibre hydrostatique
- L'hypothèse de l'incompressibilité du fluide
- La fermeture Newtonienne

La discrétisation spatiale du modèle sur l'horizontale adopte les coordonnées curvilignes et le schéma est réalisé selon une grille Arakawa C. Concernant la verticale, le modèle utilise des coordonnées sigma. Par ailleurs, la discrétisation temporelle comprend la séparation du pas de temps, le mode « time-splitting ».

Le modèle contient des conditions aux limites pour la surface libre, le fond et les frontières latérales fermées (côte) ou ouvertes (ouvertes). Les différents schémas de discrétisation satisfont les conditions de stabilité comme le critère CFL (Courant Friedrichs-Levy). De plus, le modèle ROMS considère une paramétrisation de type K-profile.

1.3. Particularités du Détroit de Danemark

La bathymétrie joue un rôle déterminant sur ce site d'étude avec la présence du seuil et le resserrement qui accélère la vitesse du courant (cf. Fig.4). Ce détroit est comme une passerelle entre les eaux denses des mers nordiques et le Nord de l'Atlantique (Käse et al., 2000). Grâce à la comparaison et de la prise en compte des données hydrographiques, cette étude va pouvoir se concentrer sur l'évolution des différents paramètres tels que la température potentielle, la salinité, la vitesse des courants ou encore la densité potentielle.

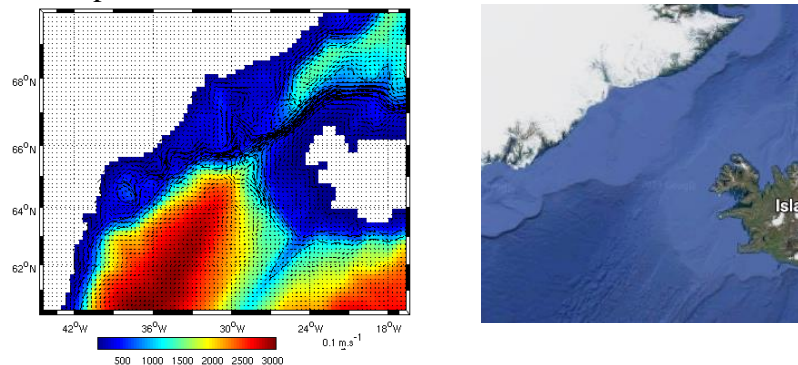


Figure4 : Carte bathymétrique de la zone d'étude sortie du modèle ROMS et le Détroit de Danemark de Google Maps

2. Méthode

L'implémentation du modèle s'est réalisée à l'aide de la version développée de l'IRD et la version est ROMS_AGRIF(Adaptive Grid Refinement in Fortran). Les outils pour réaliser la simulation sont les Romstools qui sont téléchargés au préalable sur www.croco-ocean.org. La génération du code se fait par l'intermédiaire du logiciel Matlab 2012 et la zone d'étude a été modélisée sur 10 ans.

La configuration du modèle se fait en insérant les valeurs réelles de la zone d'étude comme la position géographique avec la latitude et la longitude.

Les principaux paramètres sont fixés dans le fichier de romstools_param pour réaliser la grille du modèle, les conditions initiales et aux frontières comme suit :

- Make grid :
 - LLm=86 ; MMm= 71 ; N=32
 - mindx=12.6517 Km ; maxdx=18.5221 Km
 - mindy=12.7561 Km ; maxdy=18.4754 Km
 - dl=1/3
 - Hmax= 3032 m
 - Elon=-45 ; Wlon=-16 ; LatS=60 ; LatN=70
- roms.in, roms_inter.in, critère CFL
 - Ntimes=1200
 - Ndtfast=60
 - Dt=2160 sec

Les données utilisées sont celles de WOA2009 et le modèle du Déroit de Danemark a un bord fermé à l'Ouest seulement ce qui correspond à la côte du Groenland. Par ailleurs, un edit mask a été réalisé pour déterminer le volume d'eau de la région étudiée. Il en convient de rajouter ou supprimer des cases de mer ou de terre selon la résolution souhaitée de façon binaire (océan=1, terre=0). Les fichiers de make_forcing et make_clim sont modifiés avec les différents paramètres cités plus haut. Ces fichiers apportent les forçages atmosphériques comme l'intensité du vent, le flux de chaleur, le bilan d'évaporation-précipitation et avec les données climatologiques. Cela reproduit 7 figures de 4 plots avec l'intensité du vent, le flux de chaleur, l'apport d'eau douce, la température de surface, la salinité de surface et les ondes courtes de radiations. Le traitement de mak_clim comporte des variations climatologiques tous les 15 jours.

3. Résultats

3.1. Diagnostics

Les diagnostics démontrent une stabilité du modèle dès la troisième année pour tous les paramètres. Pour la suite des résultats, l'analyse intra-annuelle concerne l'année 6 et pour l'analyse interannuelle, ce sont les années 6 à 10 qui sont retenues. Les sorties diagnostiques du modèle sont sur la figure 4. Une saisonnalité ressort sur les paramètres de la température et de la salinité.

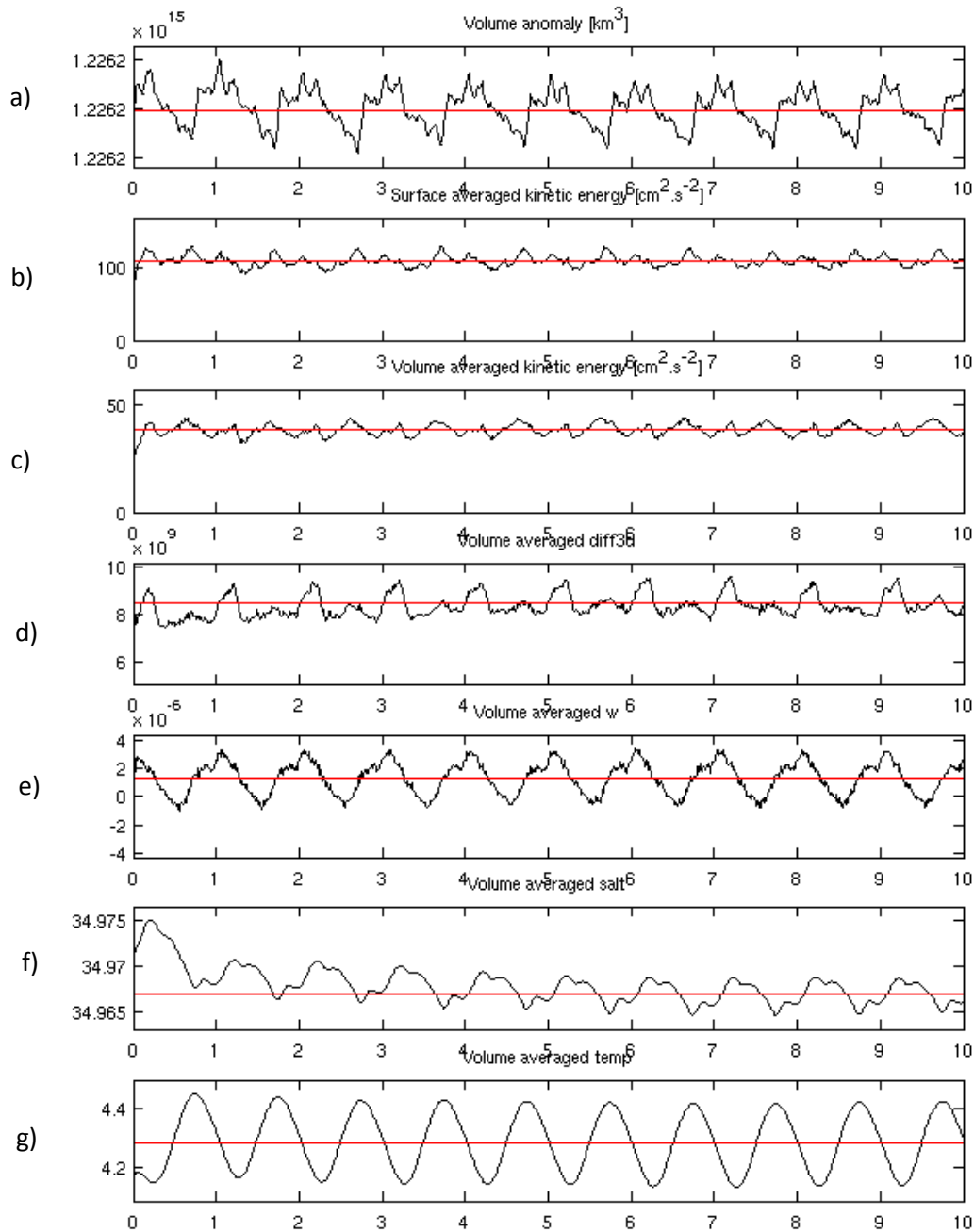


Figure 4 : Sorties diagnostiques de la simulation ROMS du Détroit de Danemark sur 10 ans, a) anomalie de volume en Km^3 , b) énergie cinétique moyennée sur la surface en cm^2/s , c) énergie cinétique moyennée sur le volume en cm^2/s , d) volume moyenné différentiel en 3D, e) vitesse verticale moyennée sur le volume, f) salinité moyennée sur le volume, g) température moyennée sur le volume

3.2. Température

Le paramètre de la température propose des variations importantes pour le Détroit de Danemark. De façon générale, pour les eaux de surface (jusqu'à 100 m de profondeur), concernant toutes les années confondues, il y a une masse d'eau chaude qui se distingue d'une masse d'eau froide pour le mois de janvier (cf. Fig.5). Au moins de juillet, la masse d'eau chaude s'élargit un peu vers l'ouest et les températures sont plus élevées sur l'ensemble de l'épaisseur d'eau.

En termes d'analyse intra-annuelle, une saisonnalité ressort donc de façon claire. En hiver⁴, l'eau de surface comporte une colonne d'eau chaude ($T^5=4-7^{\circ}\text{C}$) du côté du plateau Islandais (de 300 à 400 Km) et une masse d'eau froide ($T=0-3^{\circ}\text{C}$) à l'Ouest du détroit. En été, les eaux de surface comportent toujours une masse d'eau chaude du côté Islandais, or elle s'étend de 150 à 400 Km. Du côté du Groenland, l'eau de surface se réchauffe jusqu'à $4,5^{\circ}\text{C}$.

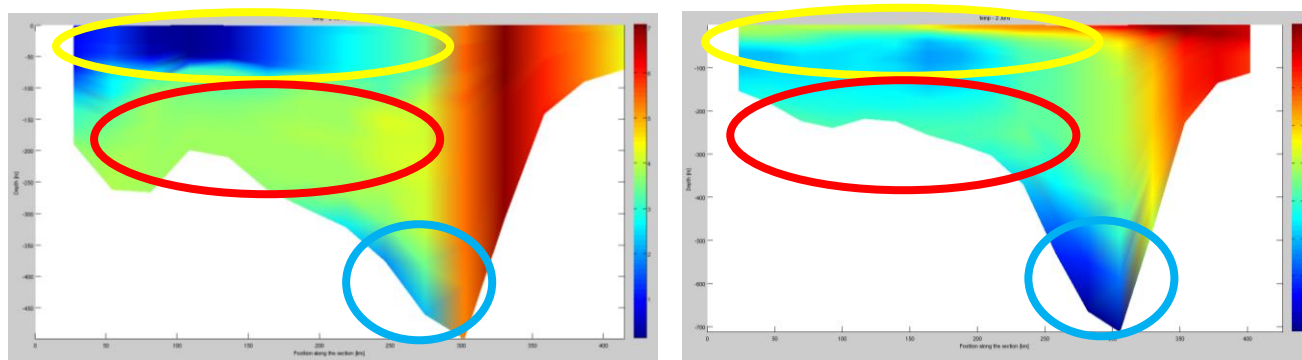


Figure 5 : Sections verticales E-W de 0 à environ 400 Km de la température en $^{\circ}\text{C}$ du mois de janvier à gauche et juillet à droite de l'année 6. Le cercle jaune représente les eaux de surface, le cercle rouge représente les eaux intermédiaires et le cercle bleu représente les eaux profondes. Ces figures sont en meilleure résolution en annexe (cf. Fig. 5_bis).

Concernant l'analyse interannuelle (de l'année 6 à 10), en hiver il n'y a que peu de variations. Or en été, un refroidissement de la masse d'eau à l'ouest peut se distinguer de l'année 8 à 9. Il y a donc une légère variation interannuelle pour la température en été concernant les eaux de surface (cf. Fig. 12_Saisonnalité_température_annexe).

L'analyse de la température des eaux de surface sur une vue du dessus montre une stratification importante au niveau du détroit comme le montre la figure 6, il y a une séparation notable des eaux froides et chaudes.

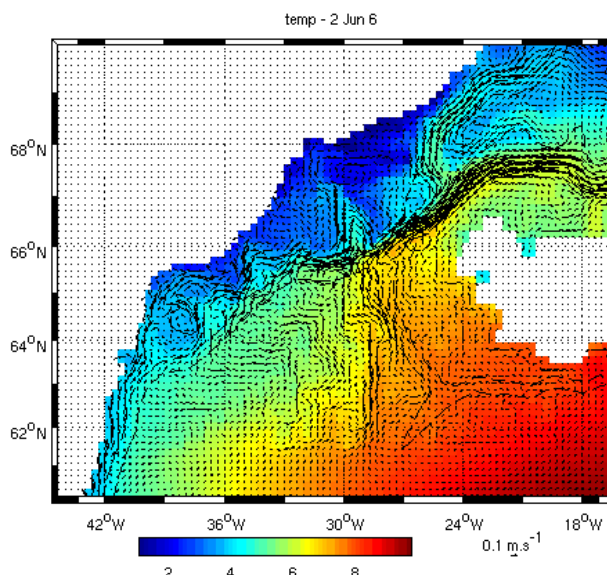


Figure6 : Représentation des températures de surface en $^{\circ}\text{C}$ du Détroit de Danemark pour le mois de janvier de l'année 6

⁴ Les saisons concernent l'hémisphère Nord, à savoir l'hiver se reporte au mois de janvier et l'été au mois de juillet

⁵ T= température potentielle en $^{\circ}\text{C}$

A présent, l'analyse des eaux intermédiaires (dès 100 m de profondeur) pour le mois de janvier est relativement similaire à celle des eaux de surface. Il se trouvent toujours une masse d'eau froide à l'Ouest et une masse d'eau chaude à l'Est du détroit. Cependant, la bulle d'eau froide du côté du Groenland est plus chaude qu'en surface ($T=3.5$ à 4.5°C) jusqu'à 300 Km le long de la section verticale (cf. Fig. 5, cercle rouge). Cela vaut pour toutes les années.

En été, l'eau intermédiaire est plus froide qu'en surface ($T=1.5$ à 3°C). Or, en comparaison interannuelle, une variation se retrouve également sur les années 8, 9 et 10 où les eaux intermédiaires comportent des températures plus basses que les années précédentes. Ainsi, une variation est présente de façon saisonnière durant l'année et sur une échelle interannuelle, il y a un rafraîchissement des eaux intermédiaires.

Concernant les eaux profondes vers 300 m de profondeur, une cellule d'eau froide ($T=1$ à 1.5°C) persiste sur le bord Ouest au fond du seuil que ce soit en été ou en hiver, sur une année ou toutes années confondues. Cette masse d'eau froide comporte des températures légèrement plus faibles en été qu'en hiver (cf. Fig. 5, cercle bleu).

3.3. Salinité

La salinité montre aussi des stratifications en surface avec une masse d'eau plus salée à l'Est et moins salée à l'Ouest, la gamme de variations étant de 33.8 à 35.2 PSU. Cependant les eaux intermédiaires et profondes sont assez stables avec des salinités allant de 34.6 à 35.2 PSU (cf. Fig.7). En hiver, une colonne d'eau salée se retrouve sur le bord Est du détroit et cela sur toutes années confondues (cf. Fig. 7, cercle bleu). En été, l'eau de surface qui est moins salée est plus mince et donc les eaux comportent dans l'ensemble des salinités plus élevées ($S^6=34.4$ à 34.8 PSU) (cf. Fig.7, cercle jaune). Il n'y a pas de variations notables concernant l'analyse interannuelle.

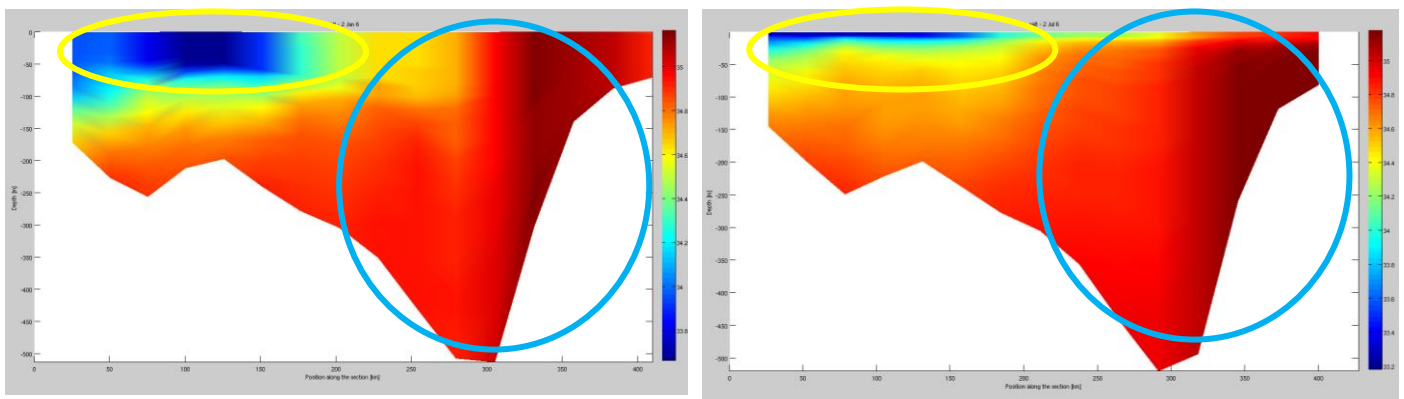


Figure 7 : Sections verticales E-W de la salinité en PSU de 0 à environ 400 Km du mois de janvier à gauche et juillet à droite de l'année 6. Le cercle jaune représente les eaux de surface, et le cercle bleu représente la colonne d'eau salée.

La vue du dessus pour les eaux de surface montre tout comme pour la température une stratification avec la présence du détroit comme le montre la figure 8 . Par ailleurs, un bras secondaire vers le Nord se distingue avec une salinité en surface plus élevée ($S=\text{environ } 34.7$ PSU) (cf. Fig. 8, cercle vert).

⁶ S=salinité en PSU

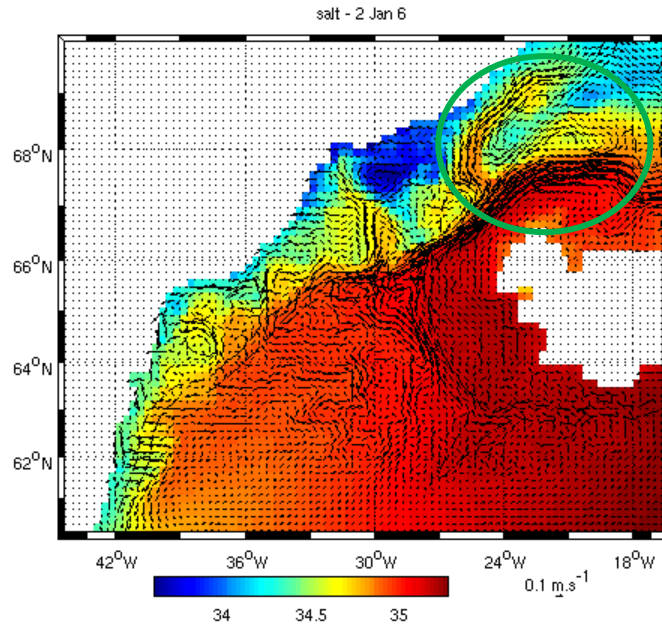


Figure 8 : Représentation de la salinité de surface du Déroit de Danemark pour le mois de janvier de l'année 6. Le cercle vert représente le bras plus salé vers le Nord.

3.4. Vitesse

Les résultats de la vitesse sont représentés sur une comparaison intra-annuelle de l'année 6 du modèle. La vitesse est très importante ($V^7=0.6$ m/s) au niveau du Déroit de Danemark et deux bras se distinguent dans la partie amont (cf. Fig.9, cercle jaune). En aval du détroit, la vitesse se redécompose en deux bras de vitesses moins élevées ($V=0.3$ m/s) que dans le détroit mais plus élevées que le reste du bassin ($V=0.05$ m/s) (cf. Fig. 9, cercle vert). En termes d'analyse intra-annuelle, le mois de mai comporte les vitesses les plus élevées et sur un plus long trajet que le reste de l'année (cf. Fig. 9).

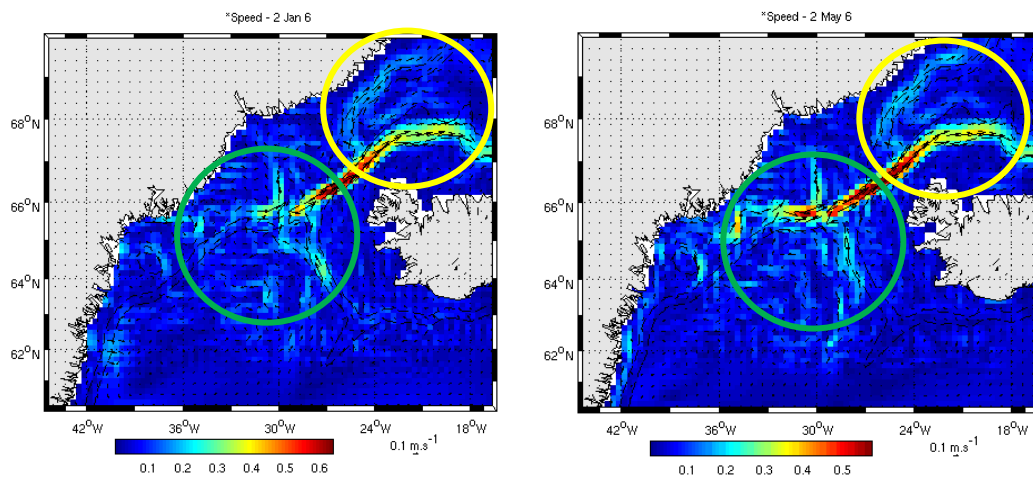


Figure 9 : Représentation de la vitesse en m/s des eaux de surface du Déroit de Danemark pour le mois de janvier et de mai de l'année 6. Le cercle jaune représente la partie amont et le vert représente la partie aval.

⁷ V=vitesse en m/s

4. Discussion

L'interprétation des résultats repose essentiellement sur la détermination des différentes masses d'eau qui recoupent le Détroit de Danemark. En effet, les courants principaux qui alimentent le passage entre le Groenland et l'Islande, se visualisent sur les sections verticales de la température, salinité et aussi à l'aide des représentations de la vitesse des eaux de surface. Ainsi, les sorties de la simulation de la zone d'étude satisfont les observations à travers la littérature. Comme Mastropole et al. en 2017 l'a avancé, les courants qui se jettent dans le détroit proviennent principalement des eaux du Courant Irminger, des eaux Polaires de surface, des eaux d'origine de l'Arctique et des eaux d'origine de l'Atlantique. Cette étude recense une vingtaine d'année de données in situ de 1990 à 2012. Leur signature s'observe sur les sections verticales comme le montre la figure 10, avec la masse d'eau d'Irminger en subsurface du côté Islandais, l'eau Polaire de surface se retrouve plus en intermédiaire au milieu du détroit, la masse d'eau Arctique tapisse le fond du seuil et finalement l'eau de l'Atlantique se positionne vers le fond du plateau continental du Groenland.

Ainsi, les masses d'eau analysées en résultats à l'aide des paramètres de la température, de la salinité et de la vitesse peuvent être assimilées à ces différents courants.

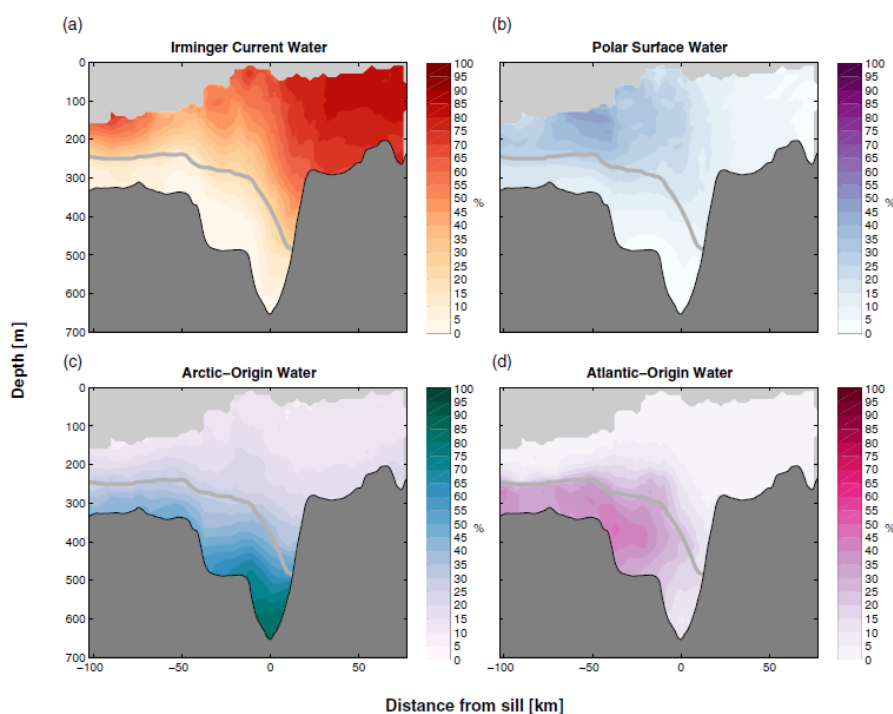


Figure 10 : Sections verticales E-W du pourcentage de présence des masses d'eau (a) eau du Courant d'Irminger (b) eau Polaire de surface (c) eau d'origine Arctique (d) eau d'origine Atlantique. La ligne grise représente l'isopycne de 27.8 kg/m^3 . Adapté Mastropole et al. en 2017

Selon l'étude de Jochumsen et al. en 2015, les eaux de surface sont aussi plus denses et leur recherche met en avant la présence du débordement du Détroit de Danemark (DSOW⁸) qui se situe sur le fond du seuil. Sur les sorties du modèle ROMS, les sections verticales de la température, de la salinité et de la vitesse sont en corrélation avec cette observation (cf. Fig 11 et Fig. 5, 7, 9).

⁸ En anglais :Denmark Strait Overflow Water

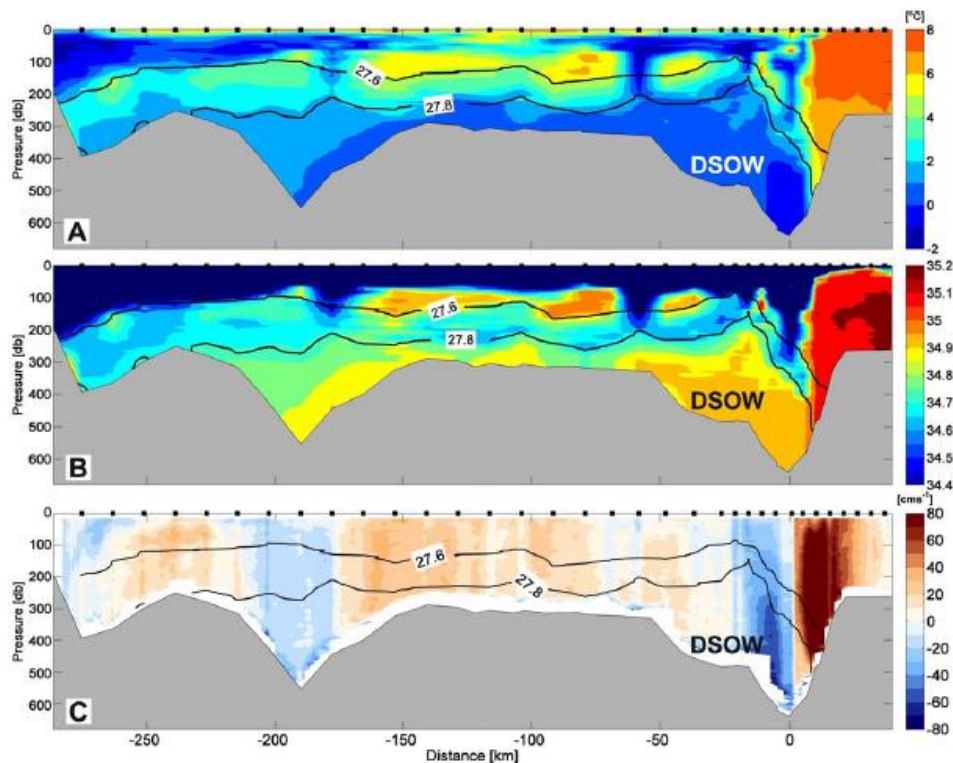


Figure 11 : Sections verticales de la température potentielle E-W, de la salinité et de la distribution des vitesses au seuil du Déroit de Danemark en juillet / août 2012 telles que mesurées lors de la croisière Poséidon P437-1. Adapté de Jochumsen et al. en 2015

A l'aide de toutes ces informations, le Déroit de Danemark comprend donc principalement 2 entrées d'eau telles que le Courant du Groenland Est et le Courant Islandais pour la partie amont du déroit et le Courant de l'Atlantique Nord pour la partie aval. L'eau d'Irminger se mélange au panache de l'EGC (Jochumsen et al., 2015). La région du Déroit de Danemark relève des refroidissements en surface qui sont le résultat du forçage atmosphérique comme cela peut être constaté sur les sorties du modèles avec le forçage atmosphérique `make_forcing` et les wind stress. (cf. Fig. 15_intensité_du_vent_annexe).

Le seuil du déroit comporte une bathymétrie déterminante avec une pente très élevée en amont et en aval ce qui accentue notablement la vorticité du courant. Par ailleurs cela bloque aussi la masse d'eau froide en amont (cf. Fig. 14_annexe). Une stratification s'observe sur les sections en long du déroit (Jochumsen et al., 2015). De plus, les cellules d'eau plus denses ont tendance à rester sur le creux du fond (cf. Fig. 13_annexe).

Les représentations de la température et salinité de surface suggèrent un flux d'eau douce froide vers 68°N et 28°W. L'hypothèse serait que cette eau ait une origine d'un fjord mais cela ne se retrouve pas spécialement dans les études citées. Cependant Jochumsen et al. en 2015 propose toute de même un déversement vers Angmagssalik qui se situe plus bas vers 65°N et 37°W.

L'étude de Kösters en 2004 propose des anomalies de densités sur le fond durant l'année. En effet, l'eau profonde se densifie en été (cf. Fig. 16_densité_été_hiver_annexe) et cela est probablement dû à des changements de vitesses ou encore un rafraichissement du débordement sur le fond. Les changements de température sur le fond sont en l'occurrence en linéarité avec ce propos (cf. Fig. 5_bis). En revanche, la variation de la salinité se discerne moins dans cette observation (cf. Fig. 7).

5. Conclusion

Pour conclure, les masses d'eau qui se déversent dans le détroit sont principalement le fruit de mélange en amont du seuil. Sur l'ensemble des sorties du modèle, les analyses intra-annuelles reflètent une saisonnalité entre l'été et l'hiver surtout pour les eaux de surface. La bathymétrie du détroit implique un obstacle topographique pour les masses d'eau denses profondes. Cela définit donc leur trajet et leur limite de passage. Par ailleurs, la présence des deux plateaux continentaux du Groenland et de l'Islande structure le passage des eaux se jetant dans le détroit.

Finalement, cette étude aurait été plus complète avec une analyse de diagramme TS pour en discuter avec la littérature. De plus, le paramètre de la glace n'a pas été implémenté dans le modèle mais il ne se retrouve cependant pas explicitement important dans la littérature non plus.

6. Résumé

Cette étude recense les sorties principales du modèles ROMS de la simulation de du Détroit de Danemark sur 10 ans. Les paramètres de la température, de la salinité et de la vitesse des courants ont été retenus pour des analyses intra-annuelles et interannuelles. La sixième année est choisie arbitrairement pour l'analyse intra-annuelle. Les résultats principaux sont que plusieurs masses d'eau s'insèrent dans le détroit, comme l'eau d'origine Arctique, Atlantique, l'eau d'Irminger et l'eau Polaire. Or ces courants subissent des mélanges importants à l'entrée du seuil et ainsi le détroit est surtout alimenté par le Courant de Groenland Est et le Courant Islandais en amont du seuil et le Courant de l'Atlantique Nord en aval. Le seuil du détroit comprend des eaux très denses limitées par l'obstacle bathymétrique du fond qui les empêchent de passer en aval.

Abstract

This study identifies the main outputs of the ROMS models of the Denmark Strait's simulation, over 10 years. The parameters of temperature, salinity and current velocity were retained for intra-annual and interannual analyzes. The sixth year is chosen arbitrarily for the intra-annual analysis. The main results are that several bodies of water enter into the strait, such as water from Arctic, Atlantic water, Irminger water and Polar water. However, these currents follow significant mixing at the entrance of the sill and thus the strait is mainly composed by the East Greenland Current and the Icelandic Current upstream of the sill and the North Atlantic Current downstream. The sill of the strait includes very dense waters limited by the bathymetric obstacle of the bottom which prevents them from passing downstream.

7. Références

- Jochumsen K., Köllner M., Quadfasel D., Dye S., Rudels B., and Valdimarsson H., 2015, On the origin and propagation of Denmark Strait overflow water anomalies in the Irminger Basin, *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, 1841–1855, doi:10.1002/2014JC010397.
- Käse R.H, Oschlies A., 2000, Flow through Denmark Strait, Institut für Meereskunde an der Universität, Kiel, Germany, *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, no. C12, pages 28,527-28,546
- Kösters F, 2004, Denmark Strait overflow : Comparing model results and hydraulic transport estimates, Departement of Geosciences, University of Kiel, Germany, *Journal of Geophysical Research*, vol. 109, C10011, doi:10.1029/2004JC002297
- Mastropole, D., Pickart R. S., Valdimarsson H., Vage K., Jochumsen K., and Girton J., 2017, On the hydrography of Denmark Strait, *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, 306–321, doi:10.1002/2016JC012007

Annexe

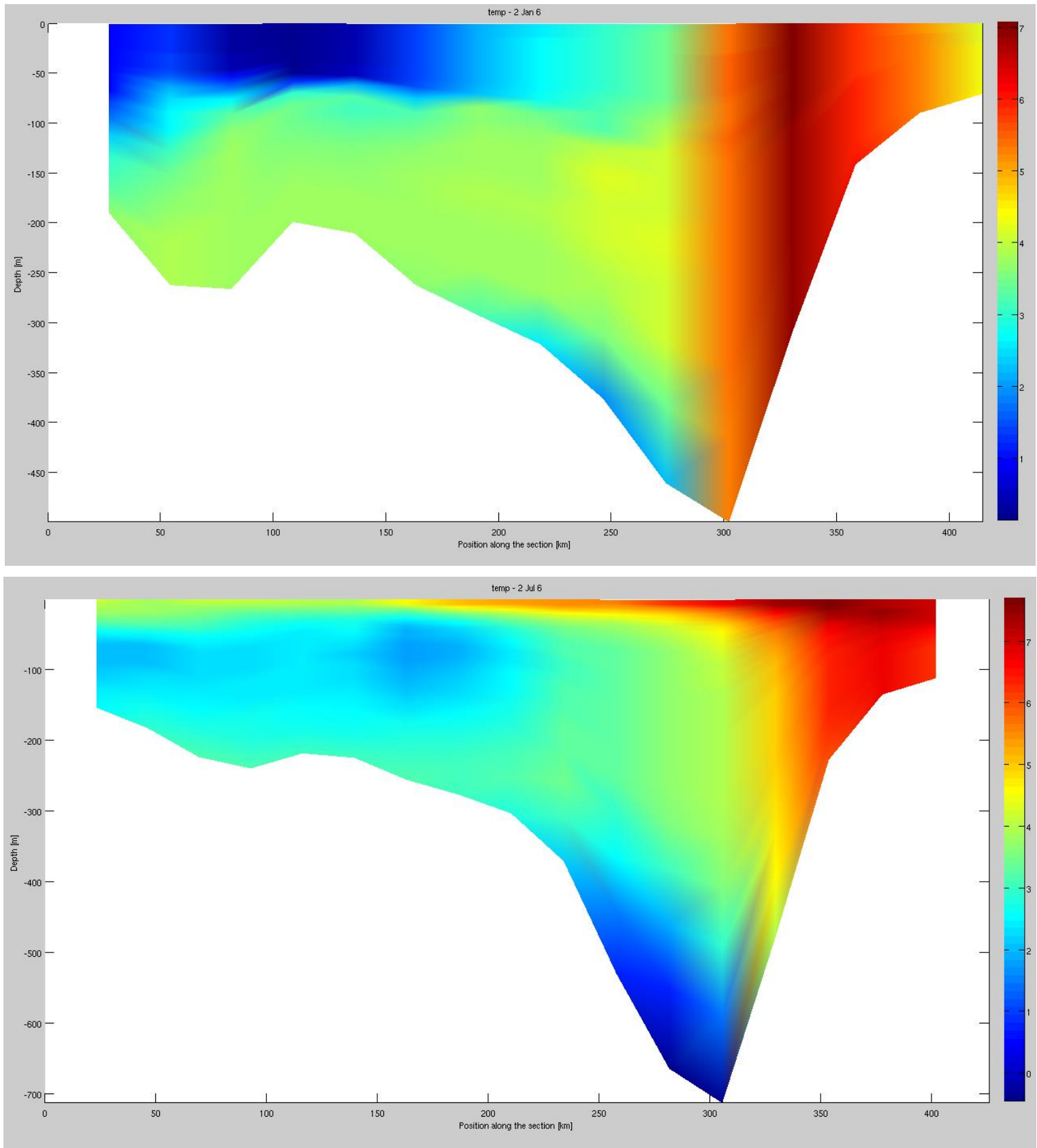


Figure 5_bis : Sections verticales de 0 à environ 400 Km de la température du mois de janvier en haut et juillet en bas de l'année 6.

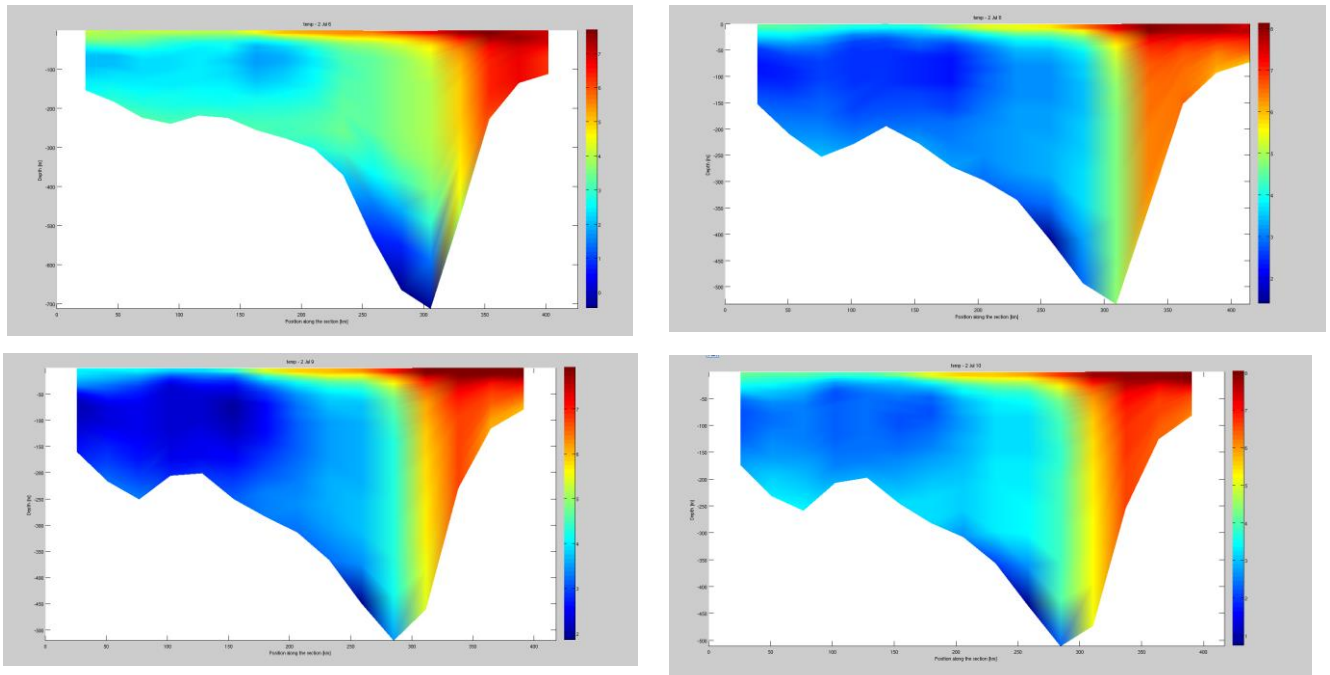


Figure 12_saisonnalité_température_annexe : Sections verticales E-W représentant la température en haut à gauche année 6, en haut à droite année 8, en bas à gauche année 9, en bas à droite année 10

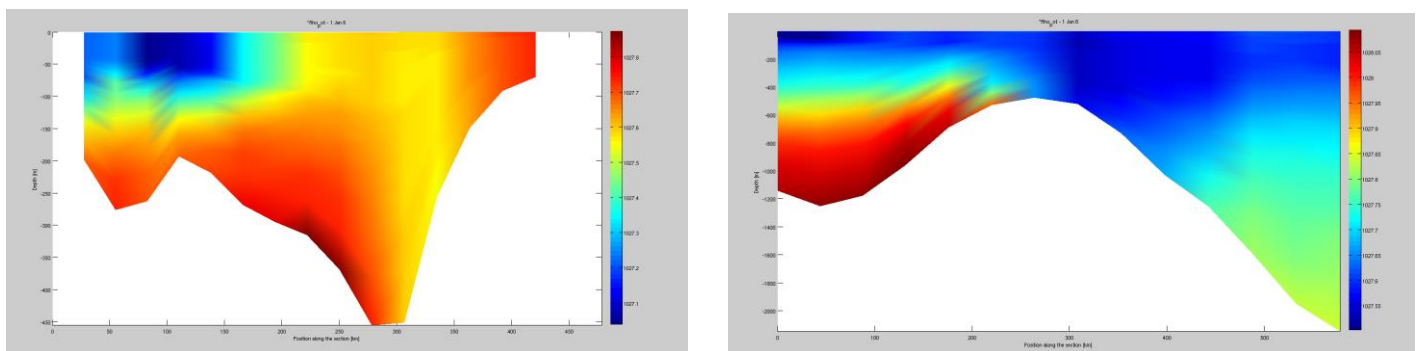


Figure 13_annexe : Représentation de la densité potentielle au mois de janvier de l'année 6, section transverse E-W et section transverse N-S

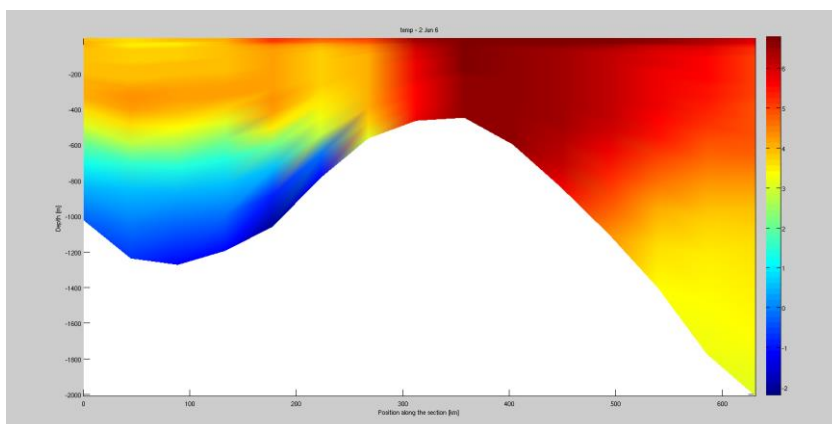


Figure 14_annexe : Section verticale de température en janvier de l'année 6 le long du détroit N-S, allant de 0 Km en amont à 600 Km en aval du seuil

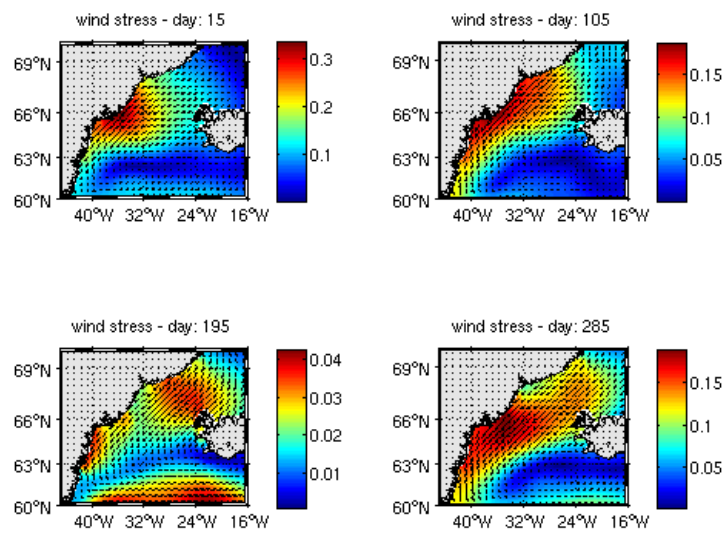


Figure 15_intensité_du_vent_annexe: Représentation du forçage du vent sur la surface de la zone d'étude du Détroit de Danemark. Les jours représentent à peu près les 4 saisons.

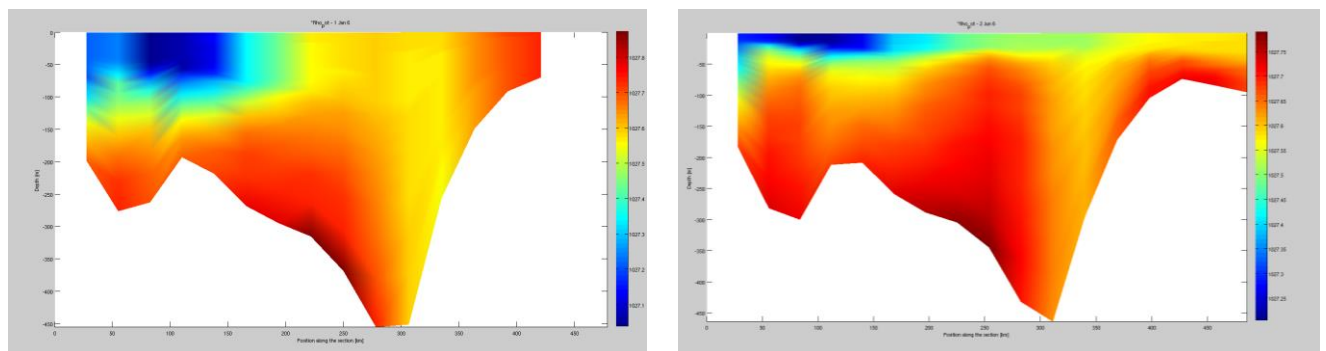


Figure 16_densité_été_hiver_annexe : Représentation de la densité potentielle au mois de janvier et juin de l'année 6, section transverse E-W